

平头立铣刀端齿平面型后刀面的磨削轨迹算法

马忠宝,唐军,李勇,江磊

(西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

摘要:端齿后刀面是影响立铣刀铣削性能和加工质量的关键因素。基于具有齿过和齿偏中心结构特征的小尺寸平头立铣刀端齿刃线,提出了用于端齿平面型后刀面的磨削轨迹算法。该算法以砂轮端面为磨削面,可在保证磨削质量的同时,通过调整砂轮摆角和抬角等工艺参数,实现砂轮磨削姿态定义的灵活性,从而避免干涉。结合五轴机床运动原理,通过 VC++ 编程求解砂轮刀位轨迹和 NC 程序。进行磨削仿真和实际加工试验,其结果最大几何误差不超过 3%。

关键词:平头立铣刀;平面型;端齿后刀面;磨削轨迹

中图分类号:TH162+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0080-05

Tool Path Algorithm for Flat Type Flank Face of Flat End Mill End Teeth

MA Zhongbao, TANG Jun, LI Yong, JIANG Lei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The flank of end teeth is the key factor affecting the milling performance and machining quality of end mill. Therefore, a grinding trajectory algorithm for the flat flank of the end tooth based on the end tooth edge line of the small-size flat-head end mill with the features of tooth over and center deviation was proposed. By the algorithm, the end face of the grinding wheel as the grinding surface was implemented. Meanwhile, with the ensured quality grinding, and by the adjustment of the process parameters such as the swing angle and the lifting angle of the grinding wheel, the flexibility of the definition of the grinding wheel grinding posture was achieved, thereby interference being avoided. Combined with the motion principle of the 5-axis machine tool, the trajectory of the grinding wheel tool position and the NC program were solved by VC++ programming. The grinding simulation and actual machining test were conducted with the maximum geometric errors less than 3%.

Keywords: flat end mill; flat type; flank face of end teeth; tool path

0 引言

整体立铣刀以其良好的切削性能和几何通用性等优势成为铣削加工的主要加工刀具之一。目前,已有不少针对于此的研究^[1]。但随着整体立铣刀结构特征的复杂性和精确性要求的提高,现有的研究无法满足市场需求。因此,针对整体平头立铣刀端齿后刀面磨削方法开展研究,对提高整体立铣刀磨削精度具有十分重要的意义。

端齿部分作为整体立铣刀轴向进给的主要切削部分,对刀具切削力和寿命影响很大^[2]。端齿后刀面根据刃磨工艺不同可分为平面型和凹面型。平面型后刀面刀尖强度大于凹面型后刀面^[3-4],应用更为普遍。除了端齿结构参数的优化设计,如何精确加工出各种特征的端齿结构也很关键。针对整体立铣刀的端齿磨削加工工艺的研究也有不少。HAN L 等^[5]针对具有齿偏中心量和刃倾角的圆弧头立铣刀端齿提出一种广义的参数化建模方法,并推导出相应的磨削刀位轨迹。但是用该算法加工后刀面时使用的是单锥面砂轮,不仅会使刀位的计算

变复杂,在加工过程中还更容易发生干涉。另外,梁志强等^[6]针对等法向前角和等径向后角微细球头铣刀的磨削提出了一套较为完整的磨削模型及机床加工的运动轨迹。该研究的体系较为完整,但是缺乏对砂轮磨削姿态进行灵活调整的考虑。CHENG X F 等^[7]在球头铣刀顶部设计了一种具有齿偏中心量的新型球头立铣刀,并描述了“S”型刃口曲线的数学模型,然后基于该算法提出了前刀面磨削方法。

由上述研究结果可知,已有的研究对实际加工过程中干涉等问题研究相对较少,且大多采用砂轮回转面进行磨削,磨削质量不高。因此,本文基于具有齿过和齿偏中心结构特征的整体平头立铣刀端齿刃线,提出了用于端齿平面型后刀面的磨削轨迹算法。该算法以砂轮端面为磨削面,可在保证磨削质量的同时,通过调整砂轮摆角和抬角等工艺参数,实现砂轮磨削姿态定义的灵活性,避免磨削干涉。然后,结合机床的运动原理,将砂轮刀位文件转换为五轴数控工具磨床的 NC 代码,实现直径 10 mm 的整体立铣刀端齿平面型后刀面的磨削。

基金项目:四川省智能制造与机器人重大科技专项(2019ZDZX0021)

第一作者简介:马忠宝(1995—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为立铣刀数字化设计制造软件开发。

1 端齿直线刃相关几何参数定义

端齿后刀面磨削轨迹算法的基础是端齿直线刃几何特征的精确描述,如图1所示。以下对端齿直线刃的相关几何参数进行定义。

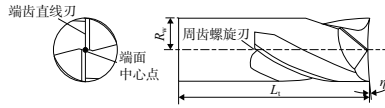


图1 端齿直线刃相关几何参数的定义

1) 刀刃长度 L_1 : 定义周齿螺旋刃沿刀具回转中心轴方向的长度为刀刃长度 L_1 。

2) 刀具起始回转半径 R_w : 定义周齿螺旋刃起始处的刀具回转体半径为刀具起始回转半径 R_w 。

3) 螺旋角 β : 定义回转体母线方向矢量与刀刃点切矢量的夹角为螺旋角 β ^[8]。

4) 锥度角 κ : 定义刀具回转体外轮廓与刀具回转中心轴线的夹角为刀具锥度角 κ 。

5) 齿偏中心量 h : 定义端面中心点到端齿直线刃的距离为齿偏中心量(或称作偏心距) h 。

6) 齿过中心量 l_h : 定义端齿直线刃沿其刃线方向超出端面中心点的距离为齿过中心量 l_h 。

7) 端齿直线刃内倾角 η : 定义端齿直线刃与垂直于刀具回转轴线平面的夹角为内倾角 η 。

8) 端齿回转半径 r : 定义刀具端齿部分刀体回转半径为 r 。根据周齿锥角的几何关系,可得

$$r = R_w - L_1 \cdot \tan \kappa \quad (1)$$

9) 端齿直线刃的长度 L_h : 定义端齿直线刃的长度为 L_h 。根据直线刃的空间几何关系,可得

$$L_h = \frac{\sqrt{r^2 - h^2} + l_h}{\cos \eta} \quad (2)$$

2 坐标系定义

2.1 工件坐标系

立铣刀砂轮磨削轨迹研究的目的是获得磨削过程中机床各轴在任意时刻的位置。为了便于立铣刀数控磨削的对刀和得到控制机床的 NC 程序,需要将磨削坐标系下的磨削轨迹变换到工件坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 对其进行描述。定义刀具回转轴为 z_w 轴,以周齿螺旋刃线起点所在端面为 $x_w O_w y_w$ 平面,如图2所示。

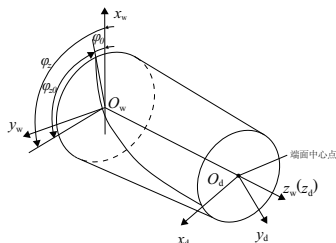


图2 工件坐标系及端齿坐标系位置示意图

定义周齿螺旋刃线末端(端齿直线刃起点)处,相对于工件坐标系 x 轴绕 z 轴的旋转角为回转角 φ_z 。等螺旋角的圆柱型和圆锥型刀具周齿刃线的相关研究已经相对完善^[8],本文采用文献[9]中推导周齿刃线过程中用到的回转角 φ_z 的推导公式,如式(3)所示。

$$\varphi_z = \begin{cases} \varphi_0 + \frac{L_1}{R_w - \cot \beta}, \kappa = 0 \\ \ln \left(\frac{R_w - L_1 \tan \kappa}{R_w} \right) \\ \varphi_0 - \frac{L_1}{\sin \kappa \cot \beta}, \kappa = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 φ_0 为初始回转角^[9]。

2.2 端齿坐标系

为了便于端齿刃线的表达,定义端齿坐标系 $O_d - x_d y_d z_d$ 。端齿坐标系可由工件坐标系绕 z 轴旋转回转角 φ_z ,再沿 z 轴正方向平移 L_1 得到,如图2所示。

本文采用变换矩阵的方式描述任意一点从端齿坐标系下的坐标 P' 转换到工件坐标系下坐标 P 的变换关系,如式(4)所示。

$$P = M_{d-w} \cdot P' + T_{d-w} \quad (4)$$

式中: M_{d-w} 表示从端齿坐标系到工件坐标系的旋转矩阵,

$$M_{d-w} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_z & -\sin \varphi_z & 0 & 0 \\ \sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

T_{d-w} 表示从端齿坐标系到工件坐标系的平移矩阵,

$$T_{d-w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.3 直线刃坐标系

为了便于直线刃后刀面的定义,定义直线刃坐标系 $O_m - x_m y_m z_m$ 。直线刃坐标系(图3)是由端齿坐标系绕 z 轴相对回转角反向旋转一个角度 φ_{zh} ,再绕 y 轴旋转一个角度 θ ,最后沿着 x 轴正方向平移 r 得到的。

$$\varphi_{zh} = \arcsin \left(\frac{h}{r} \right) \quad (7)$$

$$\theta = \left(\eta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

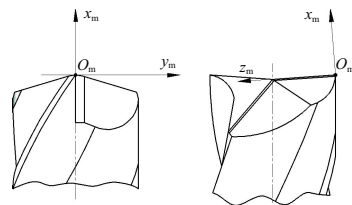


图3 直线刃坐标系示意图

同理,定义任意一点从直线刃坐标系下的坐标 P' 转换到端齿坐标系下的坐标 P 变换关系如下式:

$$P = M_{m-d} \cdot P' + T_{m-d} \quad (9)$$

式中: M_{m-d} 表示从直线刃坐标系到端齿坐标系的旋转矩阵,

$$M_{m-d} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi_{zh} & \sin\varphi_{zh} & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_{zh} & \cos\varphi_{zh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

T_{m-d} 表示从直线刃坐标系到端齿坐标系的平移矩阵,

$$T_{m-d} = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

3 端齿直线刃定义

3.1 端齿后刀面宽度和后角

端齿直线刃后刀面的定义基于直线刃坐标系。端齿后刀面宽度和后角都以 $x_m y_m$ 平面为基准,如图 4 所示。定义 P_0 点为端齿直线刃的起点, $P_0 P_1$ 为第一后刀面与 $x_m y_m$ 平面的交线, l 为第一后刀面宽度; λ 为第一后角。

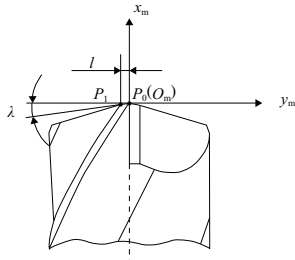


图 4 端齿后刀面宽度与角度示意图

P_0 点在直线刃坐标系的坐标为 $P_0(0,0,0)$, 则由图 4 所示的几何关系可知 P_1 点坐标可表达如下:

$$P_1 = \begin{pmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l \cdot \tan\lambda \\ l \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

3.2 端齿直线刃单位矢量

设端齿直线刃起点 P_0 处端齿直线刃的单位切矢量为 F_{xw} , 则

$$F_{xw} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

从而,端齿直线刃上的任意点 P_t 坐标可以表示为

$$P_t = t \cdot F_{xw} + P_0, 0 \leq t \leq L_h \quad (14)$$

4 砂轮轨迹计算

4.1 砂轮初始姿态

本文采用砂轮端平面磨削的方式,当砂轮为初始姿态

时,砂轮端面与端齿后刀面重合。砂轮姿态的定义都基于直线刃坐标系。

定义 P_0 指向 P_1 的矢量为 F_t , 则 F_t 垂直于 F_{xw} , 且 F_t 和 F_{xw} 构成的平面与砂轮初始姿态下的砂轮端面重合。定义此平面的法矢为砂轮轴矢量 F_g :

$$F_g = F_t \times F_{xw} \quad (15)$$

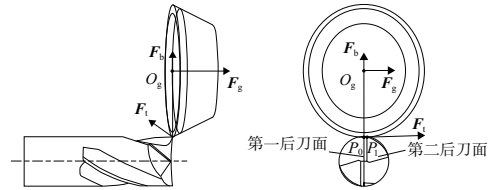


图 5 砂轮初始姿态示意图

定义 P_0 指向砂轮磨削端面圆中点 O_g (刀位点) 的矢量为 F_b , 砂轮大端面在 P_0 点与矢量 F_t 相切。由于 F_b 垂直于 F_g 与 F_t , 可得

$$F_b = F_g \times F_t \quad (16)$$

因此只要将 P_0 沿着矢量 F_b 方向移动砂轮端面半径 R_g 的距离, 即可得到刀位点坐标:

$$O_g = P_0 + R_g \cdot F_b \quad (17)$$

4.2 砂轮摆角工艺参数对初始姿态的变换

为了避免在后刀面磨削过程中可能产生的砂轮与端齿其他特征结构的干涉,在直线刃坐标系中引入砂轮摆角工艺参数。定义端齿后刀面在 P_0 点的法矢量为 F_{g0} (图 6), 则在直线刃坐标系下

$$F_{g0} = \begin{pmatrix} \cos\lambda \\ -\sin\lambda \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

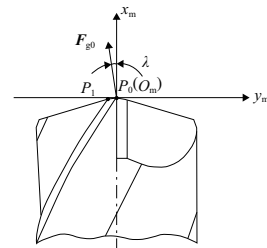


图 6 矢量 F_{g0} 示意图

定义摆角 μ_{ag} 为砂轮以 P_0 为中心, 以矢量 F_{g0} 为回转轴所旋转的角度, 如图 7 所示。

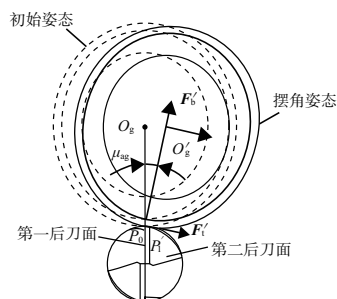


图 7 砂轮摆角示意图

已知绕空间任一单位矢量 $N(N_x, N_y, N_z)$ 旋转一个角度 γ 的旋转矩阵通式为:

$$\mathbf{R}_{ot}(N, \gamma) = \begin{bmatrix} N_x N_x v_{\text{ers}} \gamma + \cos \gamma & N_y N_x v_{\text{ers}} \gamma - N_z \sin \gamma & N_z N_x v_{\text{ers}} \gamma + N_y \sin \gamma & 0 \\ N_x N_y v_{\text{ers}} \gamma + N_z \sin \gamma & N_y N_y v_{\text{ers}} \gamma + \cos \gamma & N_z N_y v_{\text{ers}} \gamma - N_x \sin \gamma & 0 \\ N_x N_z v_{\text{ers}} \gamma - N_y \sin \gamma & N_y N_z v_{\text{ers}} \gamma + N_x \sin \gamma & N_z N_z v_{\text{ers}} \gamma + \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 $v_{\text{ers}} \gamma = 1 - \cos \gamma$ 。

则点 P_1 绕矢量 F_{g0} 旋转摆角 $\mu_{\alpha g}$ 得到点 P'_1 , 其表达式如下:

$$P'_1 = \mathbf{R}_{ot}(F_{g0}, \mu_{\alpha g}) P_1 \quad (20)$$

由点 P'_1 和点 P_0 得到矢量 F'_1 , 根据式(15)-式(17), 可得具有摆角的砂轮轴矢 F'_g 和刀位点坐标 O'_g 。

4.3 砂轮抬角工艺参数对初始姿态的变换

定义抬角 $\delta_{\alpha g}$ 为砂轮绕经过摆角变换后的矢量 F'_1 所旋转的角度, 如图 8 所示。

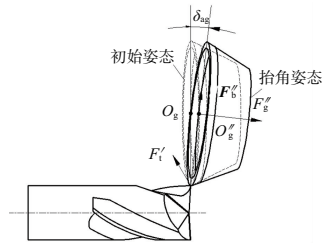


图 8 砂轮抬角示意图

直线刃坐标系下, 定义 F''_g 为经过抬角变换的砂轮轴矢量, 其可由 F'_g 绕 F'_1 旋转 $\delta_{\alpha g}$ 得到

$$F''_g = \mathbf{R}_{ot}(F'_1, \delta_{\alpha g}) F'_g \quad (21)$$

进一步根据式(15)-式(17), 可得具有抬角的砂轮刀位点坐标 O''_g 。

4.4 砂轮在工件坐标系下轨迹描述

由上述得到的刀位点坐标和砂轮轴矢量并结合式(14), 可得到端齿直线刃任意点 P_i 对应的刀位点坐标和砂轮轴矢量。再通过一系列坐标转换, 最终转换到工件坐标系下的表达式。转换矩阵如式(22)、式(23)所示, 其中 O_{g-w} 为刀位点坐标, F_{g-w} 为砂轮轴矢量。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = F_{g-w} = M_{d-w} \cdot M_{m-d} \cdot F''_g \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{pmatrix} = O_{g-w} = M_{d-w} \cdot M_{m-d} \cdot O''_g + T_{d-w} + T_{m-d} \quad (23)$$

5 磨床磨削运动量计算

本文采用国产精利 MD3015 五轴联动数控工具磨床

进行刃磨加工。该机床的拓扑运动结构为 ACYFXZ 型, 属工件双摆动类型五轴机床, 其结构和运动形式如图 9 所示。砂轮组配置如图 10(a) 所示, 由 1V1 型、1A1 型和 11V9 型 3 片砂轮组成。其中, 11V9 型砂轮用于制造整体式平头立铣刀的端齿后刀面部分, 并且选择砂轮端面 I 作为端面进行后刀面刃磨。另外两个砂轮用于加工整体式平头立铣刀的其他部分。

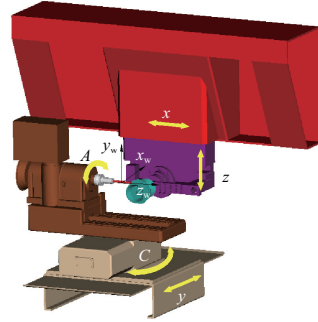


图 9 MD3015 型五轴数控工具磨床运动形式

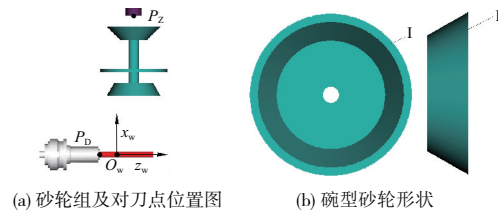


图 10 砂轮轴上砂轮配置及碗型砂轮形状

结合实际加工需求, 建立两个对刀点(主轴对刀点 P_z 和夹头对刀点 P_D)。两个对刀点的位置如图 10(a) 所示, 分别位于主轴和夹头的端面中心处。结合五轴数控后置处理算法的研究^[10], 定义 A 、 C 、 S_x 、 S_y 和 S_z 为磨削过程中机床 A 、 C 、 x 、 y 和 z 轴相对对刀点的运动角度和距离值, 可得到描述工件坐标系下的砂轮轨迹坐标与机床各轴运动位置的转换关系:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{ot}(Y, -90) \cdot T_{\text{rans}}(X, \Delta L - \Delta X) \cdot \mathbf{R}_{ot}(X, A) \cdot$$

$$\mathbf{R}_{ot}(Z, C) \cdot T_{\text{rans}}(X, \Delta X) \cdot T_{\text{rans}}(S) \cdot T_{\text{rans}}(Y, \Delta Y) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{ot}(Y, -90) \cdot \mathbf{R}_{ot}(X, A) \cdot \mathbf{R}_{ot}(Z, C) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

式中: ΔX 为夹头对刀点 P_D 偏离 C 轴回转轴的投影距离; ΔY 为砂轮安装面相对主轴对刀点 P_z 的 y 向距离; ΔL 为夹头对刀点 P_D 相对工件坐标系原点的 x 向距离。

整体立平头立铣刀端齿第二后刀面的刃磨方法与主后刀面类似, 并且需要指出的是, 主后刀面的宽度是通过控制第二后刀面刃磨过程实现的。

6 试验验证

基于本文所提出的磨削轨迹算法,利用 VC++ 环境开发了一套算法程序模块,输入相关工艺参数以后,按照一定步长循环计算即可获得理论端齿刃线所对应的砂轮磨削数控程序。将 NC 程序导入 Vericut 仿真软件,进行磨削仿真并检查干涉情况。端齿后刀面磨削仿真结果如图 11 所示。

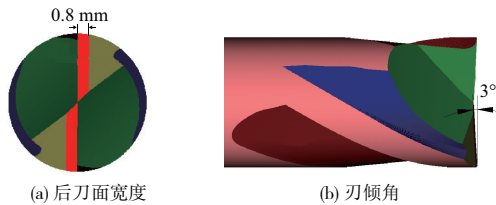


图 11 仿真结果

实际磨削过程如图 12 所示。砂轮转速为 25 m/s,进给速度为 10 mm/s,磨削过程采用磨削油冷却。



图 12 实际磨削加工过程

在保持相同工艺参数和数控程序条件下,连续磨削 3 把整体平头立铣刀,利用刀具检测仪 PG-1000 分别对磨削后的 3 把立铣刀的几何参数进行观测,如图 13 所示。对端齿后刀面的后角、主后刀面宽度和端齿向心角进行测量,测量结果如表 1 所示。刀具参数误差在 3% 以内,与设计值具有较高的吻合度,且经过砂轮抬角及摆角的微调,磨削过程并未出现干涉情况。

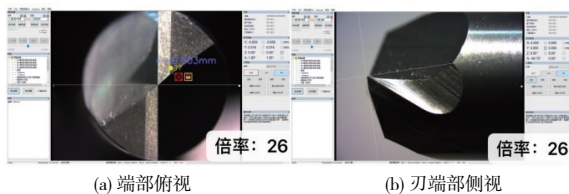


图 13 实际磨削得到整体式平头立铣刀端齿部分

7 结语

1) 提出了以砂轮端面为磨削面的端齿平面型后刀面

的磨削轨迹算法,可在保证磨削质量的同时,通过调整砂轮摆角和抬角等工艺参数,实现砂轮磨削姿态定义的灵活性,避免干涉。

表 1 立铣刀端齿后刀面几何参数设计值与实测值

分类	参数		
	后角 $\lambda/(\circ)$	后刀面宽度 l/mm	刃倾角 $\eta/(\circ)$
设计值	8.00	0.800	3.00
刀具 1	8.00	0.803	3.01
刀具 2	7.87	0.798	3.04
刀具 3	8.01	0.812	2.93

2) 基于五轴数控工具磨床的运动原理推导出机床各轴运动位置与工件坐标系坐标的转换关系,计算了磨床的进给运动量。

参考文献:

- [1] 李国超,孙杰. 整体式立铣刀刃磨仿真技术研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2015,51(9):165-175.
- [2] DANG J W, ZHANG W H, YANG Y, et al. Cutting force modeling for flat end milling including bottom edge cutting effect [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(11):986-997.
- [3] LI A H, ZHAO J, PEI Z Q, et al. Simulation-based solid carbide end mill design and geometry optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9/10/11/12):1889-1900.
- [4] WANG L P, SI H, GU L H. Prediction of cutting forces in flank milling of parts with non-developable ruled surfaces [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(7):1788-1796.
- [5] HAN L, CHENG X F, JIANG L, et al. Research on parametric modeling and grinding methods of bottom edge of toroid-shaped end-milling cutter [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(1):31-43.
- [6] 梁志强,李世迪,周天丰,等. 等法向前角和等径向后角微细球头铣刀刃磨研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(5):196-203.
- [7] CHENG X F, DING G F, LI R, et al. A new design and grinding algorithm for ball-end milling cutter with tooth offset center [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(7):687-697.
- [8] 龚智辉,宾鸿赞. 螺旋角的广义定义及其应用 [J]. 中国机械工程, 1994, 5(1):14-15.
- [9] 何耀雄,周云飞,周济. 广义螺旋运动与复杂回转刀具几何建模 [J]. 航空学报, 2002, 23(2):135-139.
- [10] 辛全琦,王太勇,陶浩,等. 五轴数控后置处理算法研究与球头铣刀刃磨轨迹优化设计 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(9):1380-1386.

收稿日期:2020-05-25